

日本国特許庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されて
いる事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed
with this Office

出願年月日

Date of Application:

2002年 7月16日

出願番号

Application Number:

特願2002-207471

[ST.10/C]:

[JP2002-207471]

出願人

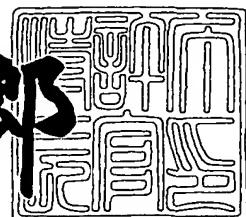
Applicant(s):

アンリツ株式会社

2003年 6月10日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

太田 信一郎



出証番号 出証特2003-3045232

【書類名】 特許願

【整理番号】 A000203489

【提出日】 平成14年 7月16日

【あて先】 特許庁長官 殿

【国際特許分類】 H01L 31/10

【発明の名称】 半導体受光素子

【請求項の数】 9

【発明者】

【住所又は居所】 東京都港区南麻布五丁目10番27号 アンリツ株式会社内

【氏名】 河野 健治

【発明者】

【住所又は居所】 東京都港区南麻布五丁目10番27号 アンリツ株式会社内

【氏名】 吉田谷 弘明

【発明者】

【住所又は居所】 東京都港区南麻布五丁目10番27号 アンリツ株式会社内

【氏名】 平岡 淳

【発明者】

【住所又は居所】 東京都港区南麻布五丁目10番27号 アンリツ株式会社内

【氏名】 佐々木 雄一

【特許出願人】

【識別番号】 000000572

【氏名又は名称】 アンリツ株式会社

【代理人】

【識別番号】 100058479

【弁理士】

【氏名又は名称】 鈴江 武彦

【電話番号】 03-3502-3181

【選任した代理人】

【識別番号】 100084618

【弁理士】

【氏名又は名称】 村松 貞男

【選任した代理人】

【識別番号】 100068814

【弁理士】

【氏名又は名称】 坪井 淳

【選任した代理人】

【識別番号】 100092196

【弁理士】

【氏名又は名称】 橋本 良郎

【選任した代理人】

【識別番号】 100091351

【弁理士】

【氏名又は名称】 河野 哲

【選任した代理人】

【識別番号】 100088683

【弁理士】

【氏名又は名称】 中村 誠

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 011567

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

特2002-207471

【包括委任状番号】 9105972

【ブルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 半導体受光素子

【特許請求の範囲】

【請求項1】 基板上に、光導波路としての機能を有する第1の半導体層を含む下部半導体層、前記第1の半導体層より高い屈折率を有する光吸收層、前記第1の半導体層より低い屈折率を有する第2の半導体層を含む上部半導体層を順番に積層し、前記基板と前記下部半導体層と前記光吸收層の少なくとも一つの端面を含む光入射端面から所定角度で入射した光が前記光吸收層において吸収されることにより生じた電流を、前記上部半導体層及び下部半導体層をそれぞれ経て電極から外部に出力する半導体受光素子であって、

前記光吸收層に入射した光の一部は前記光吸收層内と前記第1の半導体層内との少なくとも一方を前記第2の半導体層の下面に平行方向に伝搬し、かつ前記光吸收層に入射した光の他の一部は前記第2の半導体層の下面で反射し前記光吸收層内及び前記第1の半導体層内を斜め方向に伝搬することを特徴とする半導体受光素子。

【請求項2】 前記光入射端面と前記光吸收層の下面とのなす角度が90度であることを特徴とする請求項1記載の半導体受光素子。

【請求項3】 前記光入射端面と前記光吸收層の下面とのなす角度は、90度未満で、かつ前記光入射端面を構成する材料の結晶方位で定まる角度であることを特徴とする請求項1記載の半導体受光素子。

【請求項4】 前記光入射端面と前記光吸收層の下面とのなす角度は、90度未満で、かつ前記光入射端面を構成する材料の結晶方位で定まる角度より大きな角度であることを特徴とする請求項1記載の半導体受光素子。

【請求項5】 前記第1の半導体層が4元組成の半導体材料からなることを特徴とする請求項1乃至4のいずれか1項記載の半導体受光素子。

【請求項6】 前記光入射端面に入射する光にとって、前記下部半導体層の等価屈折率が前記上部半導体層の屈折率よりも高くなるように、前記下部半導体層は屈折率の高い層と低い層の組合せからなることを特徴とする請求項1乃至5のいずれか1項記載の半導体受光素子。

【請求項7】 前記下部半導体層がn型の半導体材料からなり、前記上部半導体層がp型の半導体材料からなることを特徴とする請求項1乃至6のいずれか1項記載の半導体受光素子。

【請求項8】 前記下部半導体層がp型の半導体材料からなり、前記上部半導体層がn型の半導体材料からなることを特徴とする請求項1乃至6のいずれか1項記載の半導体受光素子。

【請求項9】 前記光の前記光入射端面に対する入射位置と入射角度との少なくとも一方を調整することにより、この入射した光が前記光吸收層に照射されるようにしたことを特徴とする請求項1乃至8のいずれか1項記載の半導体受光素子。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は入射した光を電流に変換する半導体受光素子に関する。

【0002】

【従来の技術】

入射した光を電流に変換する半導体素子で形成された一般的な半導体受光素子の構成を図13に示す斜視図を用いて説明する。

【0003】

n⁺-InPからなる基板6上に、n-InPからなる下部クラッド層5が形成され、この下部クラッド層5上にi-InGaAsからなる光吸收層4、p-InPからなる上部クラッド層3、p⁺-InGaAsからなるコンタクト層2が形成されている。このコンタクト層2の上面にp電極1が取付けられ、基板6の下面にn電極7が取付けられている。さらに、側面にポリイミド8が形成されている。

【0004】

i-InGaAsからなる光吸收層4とp-InPからなる上部クラッド層3とn-InPからなる下部クラッド層5とは、図13に示すように、この半導体受光素子の端面の光入射面から内部に入射した光を導波する光導波路を構成している。この光導波路は、光吸收層4の屈折率を、上部クラッド層3の屈折率、下部クラッド層5の

屈折率より高く設定し、この光吸收層4が入射した光を導波する中心的な役割をするコアとして機能している。

【0005】

このように構成された半導体受光素子においては、入射光は、i-InGaAsからなる光吸收層4、p-InPからなる上部クラッド層3及びn-InPからなる下部クラッド層5で構成された光導波路を伝播する間に、光吸收層4により吸収され、電気信号に変換される。この時、光はその強度Iが(1)式に従って吸収される。

【0006】

$$I = I_0 \exp(-\alpha z) \quad \cdots (1)$$

ここで、 I_0 は光入射端面での入射光のパワー、 α は吸収係数、 z は光入射端面からの距離である。

【0007】

図14にこの半導体受光素子の光導波路内を伝搬する光の強度Iと距離zとの関係を示す。

【0008】

(1)式と図14から理解できるように、光は光導波路内に入射すると指數関数的に減衰する。すなわち、光は、光入射端面から短い距離の間にほとんど吸収され、電流に変換される。図14の縦軸は、光が光吸收層4内を伝搬するとともに各点において光が吸収されたために生じる電流を示している。各点において生じる熱は負荷抵抗をRとして I^2R となるので、入射端面から短い距離の間にほとんど吸収されるということは、この短い距離の間に急激に発熱するとも言える。

【0009】

その結果、入射する光のパワーが大きいと短い距離の間で発生するジュール熱が極めて大きくなり、この半導体受光素子が破壊されてしまうことになる。

【0010】

なお、図13の斜視図では説明を簡単化するために省略したが、実際には光導波路を多モード化するために、通常、光吸收層4の上下にバンドギャップ波長が $1.3\mu m$ 程度のInGaAsP組成の4元SCH層を介在させている。そのため、光吸收層4の厚みを $0.6\mu m$ 、SCH層が上下合わせて $2\mu m$ 程度とすると、成長すべ

き結晶の厚みは合計3~4 μmと厚くなり、結晶成長そのものにも時間がかかるとともに、メサエッティングなどプロセスも複雑になり、製造上の歩留まりを制限する要因となっている。

【0011】

このような不都合を解消するために、図15、16に示す装荷光導波路型の半導体受光素子が提唱されている。なお、図15は斜視図であり、図16は横断面図である。図13に示す半導体受光素子と同一部分には同一符号が付してある。

【0012】

n^+ -InPからなる基板6上に、装荷光導波路層9が形成され、この装荷光導波路層9上に、 i -InGaAsからなる光吸收層4、 p -InPからなる上部クラッド層3、 p^+ -InGaAsからなるコンタクト層2が形成されている。このコンタクト層2の上面にp電極1が取付けられ、基板6の下面にn電極7が取付けられている。さらに、側面にポリイミド8が形成されている。

【0013】

装荷光導波路層9としては、その屈折率が光吸收層4よりも小さく、かつ基板6よりも大きな材料が適しており、例えば、バンドギャップ波長1.3 μmを有するn-InGaAsPなどが使用される。

【0014】

このような、装荷光導波路型の半導体受光素子において、図15、図16に示すように、外部から光を装荷光導波路層9の端面に入射させる。この装荷光導波路層9内を伝搬する光の一部（エバネッセント波）が、図16の断面図に示すように、隣接する光吸收層4に染み出して結合（エバネッセント結合）しており、その光の受光感度は、装荷光導波路層9に固有な波動関数 ϕ_S と光吸收層4の固有波動関数 ϕ_C との重なり積分の絶対値の2乗

$$\Gamma = | \int \int \phi_S \cdot (\phi_C)^* dx dy |^2 \quad \cdots (2)$$

に比例する。

【0015】

図17に光が装荷光導波路層9を伝搬しつつ光吸收層4にエバネッセント結合し、吸収される様子を模式的に示す。図17(a)が装荷光導波路層9の厚みD

が薄い場合（例えば、 $D = 0.7 \mu m$ ）を示し、図17（b）が装荷光導波路層9の厚みDが厚い場合（例えば、 $D = 3.5 \mu m$ ）を示す。

【0016】

また、図18に半導体受光素子内を伝搬する光のパワーIを光吸收層4内の距離zの関数として示す。図18（a）が装荷光導波路層9の厚みDが薄い場合（例えば、 $D = 0.7 \mu m$ ）を示し、図18（b）が装荷光導波路層9の厚みDが厚い場合（例えば、 $D = 3.5 \mu m$ ）を示す。

【0017】

図17（a）と図18（a）に示す装荷光導波路層9の厚みDが薄い場合には、装荷光導波路層9を伝搬する光のスポットサイズが小さく、装荷光導波路層9を伝搬する光は光吸收層4へ強くエバネッセント結合する。別の表現をすると、装荷光導波路層9を伝搬する光のスポットサイズが小さいため、装荷光導波路層9を伝搬する光の波動関数 ϕ_S のうち、光吸收層4に重なる部分の値が大きくなるので(2)式で示した Γ も大きくなる。なお、装荷光導波路層9の端面に入射する光のスポットサイズは、装荷光導波路層9の厚みDに係わらず等しく設定されている。

【0018】

その結果、半導体受光素子として要求される受光感度を実現するために必要な光吸收層4の長さ L_a を短くできるものの、図13に示した半導体受光素子と同様に、短い距離zにおいて大きなジュール熱が発生し、素子が破壊されることになる。

【0019】

このジュール熱による素子破壊を避けるには、装荷光導波路層9を伝搬する光の光吸收層4へのエバネッセント結合の度合いを弱くする、つまり、図17（b）と図18（b）に示すように、装荷光導波路層9の厚みDを厚くすることにより、装荷光導波路層9を伝搬する光のスポットサイズを大きくすればよい。別の表現をすれば、装荷光導波路層9を伝搬する光の波動関数 ϕ_S のうち光吸收層4に重なる部分の値を小さくすれば良いことになる。但し、この場合には、(2)式で示した Γ も小さくなるので、半導体受光素子として要求される受光感度を実現

するために必要な光吸收層4の長さ L_a が長くなってしまう。

【0020】

この光吸收層4の長さ L_a が長くなるということは、半導体受光素子としてのキャパシタンスCが大きくなることに対応するので、3dB帯域 Δf ($= 1 / (\pi R C)$) が小さくなり、この半導体受光素子を40Gbpsのような高速伝送システムへの適用は困難となる。

【0021】

また、この場合には装荷光導波路層9の厚みDが厚いので成長すべき半導体層の厚みの総和が厚くなり、結晶成長への負担が著しく大きくなる。一般に、3μm以上厚く結晶成長すると、結晶成長した半導体層に歪が内在し、その上に成長した光吸收層4の膜質が劣化する。この膜質の劣化は光伝送においてきれいなアイパターンを実現するために不可欠な半導体受光素子としての暗電流特性を損なうことが知られている。

【0022】

さらに、装荷光導波路層9の厚みDを厚くし、スポットサイズを大きくすると、コンタクト層2に起因する光吸收損を低減するために、上部クラッド層3も厚くする必要があり、良好な結晶成長がよりいっそう困難になってしまう。

【0023】

以上のように、図15、図16に示す装荷光導波路型の半導体受光素子においては、高速動作を実現するために、光吸收層4の長さ(素子長) L_a が短くなるように装荷光導波路層9を伝搬する光のスポットサイズを小さくすればジュール熱により素子が破壊されやすく、またこの熱破壊を避けるために装荷光導波路層9を伝搬する光のスポットサイズを大きくすれば、素子長 L_a が長くなる。その結果、高速動作が困難になるという問題点があった。また厚く成長した結晶の上に結晶性の良い暗電流の少ない光吸收層4の成長は困難であり、半導体受光素子としての特性が劣化するという問題点もあった。

【0024】

このような不都合を解消するために、図19の横断面図で示すような構造を有した端面屈折型の半導体受光素子が提唱されている(特開平11-195807号公報)

【0025】

半絶縁性InP (SI-IP) 材料で形成された基板11上に、 n^+ -InPからなる下部クラッド層10、i-InGaAsからなる光吸収層4、p-InPからなる上部クラッド層3、 p^+ -InGaAsからなるコンタクト層2が形成されている。そして、このコンタクト層2の上側にp電極1を取付け、n-InPからなる下部クラッド層10にn電極7を取付けている。

【0026】

そして、この受光素子においては、図19で示したように、基板11と下部クラッド層10との端面で形成される光入射端面12をウェットエッチングにより傾斜させている。なお、光入射端面12の下部クラッド層10の上面（光吸収層4の下面）に対する傾斜角はエッチングの際に結晶の方位性から約54度となる。

【0027】

このような構造を有した端面屈折型の半導体受光素子の動作原理を説明する。入射した光は傾斜した入射端面12において屈折された後、光吸収層4において吸収され、電流に変換される。具体的には、この端面屈折型の半導体受光素子の場合、空気（屈折率=1）と n^+ -InPからなる下部クラッド層10（InPの屈折率は3.17であるが、 n^+ ドーピングのためにその屈折率は3.15程度に下がる）の屈折率の違いにより光はその光路を斜め上方に変えられ、光吸収層4を斜め上方に通過する。

【0028】

このように、この端面屈折型の半導体受光素子の場合、光を光吸収層4を斜めに通過させることにより、この光吸収層4を通過する際の実効的な吸収長を長くし、受光感度を高めている。

【0029】

しかしながら、実際には光吸収層4を斜め上方に通過した光はさらに上部クラッド層3とコンタクト層2を斜め上方に伝搬した後、p電極1の下面で反射され、斜め下向きに光路の向きを変えられる。次に、再度コンタクト層2と上部クラ

ップ層3を通過後、光吸收層4を斜め下方に通過する。

【0030】

ところが、残念ながら、 p^+ -InGaAsからなるコンタクト層2において吸収された光は電流に変換されないため、単に光吸收損となってしまう。さらに、p電極1の下面における反射の際、このp電極1の下面の荒れのため光散乱損が生じる。このように、この端面屈折型の半導体受光素子は損失が生じやすく、その結果その受光感度は0.6 A/Wもしくはそれ以下と低く留まっていた。

【0031】

このような受光感度に関する問題点を解消するために、図20の横断面図で示すような構造を有した半導体受光素子が提唱されている（特開20001-53328号公報）。

【0032】

半絶縁性InP (SI-IP) 材料で形成された基板1'1'上に、InGaAsP層1'4'、n-InGaAsP層1'3'、i-InGaAsからなる光吸收層4'、p-InPからなる上部クラッド層3'、 p^+ -InGaAsからなるコンタクト層2が形成されている。そして、このコンタクト層2の上側にp電極1を取付け、n-InGaAsP層1'3'にn電極7を取付けている。

【0033】

そして、この半導体受光素子においては、InGaAsP層1'4'とn-InGaAsP層1'3'との端面で形成される光入射端面1'2をウェットエッチングにより傾斜させていく。

【0034】

このような構造を有した半導体受光素子の動作原理を図21を用いて説明する。

一般に、nドーピングをすると屈折率は低減するが、ここでは、説明を簡単にするために、n-InGaAsP層1'3'の屈折率 n_{13} とInGaAsP層1'4'の屈折率 n_{14} は同じ値である ($n_{13} = n_{14} = 3.439$) と仮定し、図21ではn-InGaAsP層1'3'とInGaAsP層1'4'をn-InGaAsP層1'3'により代表させている。

【0035】

この半導体受光素子においては、上部クラッド層3よりも屈折率が高いInGaAsP層14に光の全パワーが入射している。その結果、光は光吸收層4中において吸収されつつ斜め上方に伝搬した後、光吸收層4と上部クラッド層3の界面において全反射される。

【0036】

さて、特開2001-53328号公報の第1の請求項には「前記下部半導体層側から入射した入射光が、前記光吸收層を膜厚方向に対し斜めに通過し、前記第一の半導体層の前記光吸收層側の界面で全反射し、前記光吸收層を再度斜めに通過することを特徴とする」と記載され、発明の詳細な説明には「100%の光が再度光吸收層を通過し吸収される」、「受光層を光が2回通過することになり、実効的光吸收長が2倍となる」と記載されている。さらに、特開2001-53328号公報に図示された全ての実施形態においても、光は全反射後、斜め下方に伝搬し、光吸收層を通過している。

【0037】

つまり、この半導体受光素子では、図21に示したように光は光吸收層4中ににおいて吸収されつつ斜め上方に伝搬した後、光吸收層4と上部クラッド層3の界面においてその100%の光が反射され、光吸收層4を斜め下方に伝搬することになる。

【0038】

従って、図21から理解できるように、光吸收層4の厚みをT、光の通過角を ϕ とすると、光にとっての実効的な吸収長 L_e は(3)式となる。

$$L_e = 2T / \cos \theta = 2T / \cos (\pi/2 - \phi) \quad \cdots (3)$$

つまり、光吸收層4の厚みTと光の通過角 ϕ を各々 $0.4\mu m$ 、 25.8° とすると、この半導体受光素子においては光の実効的な吸収長 L_e は光吸收層4の厚みTの2.3倍（なぜならば、 $1/\cos \theta = 1/\cos (\pi/2 - 25.8^\circ) = 2.3$ ）程度に留まり、吸収長としては不充分である。

【0039】

また、特開2001-53328号公報に記載された全ての実施形態の説明図や図20から推測されるように、この半導体受光素子では、光は光吸收層4と上部クラッ

ド層3の界面においてその100%の光が反射され、光吸收層4を斜め下方に伝搬して通過してしまう。したがって、光吸收層4をある程度の長さ以上いくら長くしても受光感度は改善されない。

【0040】

さらに、このこの半導体受光素子では、記載された実施形態から理解できるように、光の全パワーをInGaAsP層14のように屈折率の高い層の中に入射せねばならない。光のスポットサイズ（パワーが $1/e^2$ となる半径）は $2\text{ }\mu\text{m}$ から $5\text{ }\mu\text{m}$ 、つまりパワーが $1/e^2$ となる直径では $4\text{ }\mu\text{m}$ から $10\text{ }\mu\text{m}$ と大きい。図15、図16の装荷光導波路型の半導体受光素子で述べたように、厚く成長した結晶の上には、暗電流が少ない結晶性の良い光吸收層を成長することは困難である。

【0041】

また、特開2001-53328号公報の実施形態に示されているGaAs基板の上に $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 帶用のInGaAsPやInGaAsを結晶成長した構造を製作するのは、格子不整合の観点から實際には不可能である。したがって、この図20に示す半導体受光素子を實際に製造することは極めて困難であるという問題点があった。

【0042】

【発明が解決しようとする課題】

以上説明したように、図13に示す導波路型の半導体受光素子では高光入力時の信頼性に、また図15、図16に示す装荷光導波路型の半導体受光素子では高光入力時の信頼性、高速応答性、および光吸收層の結晶性（換言すれば、暗電流特性）に、さらに図19、図20に示す端面屈折型の半導体受光素子では受光感度、あるいは光吸收層の結晶性に問題があった。

【0043】

本発明はこのような事情に鑑みてなされたものであり、光吸收層内へ入射した光の伝搬路を調整することによって、光を効率的に光吸收層で電流に変換で、受光感度、耐光入力性、高速応答性、暗電流特性を大幅に向上去できる半導体受光素子を提供することを目的とする。

【0044】

【課題を解決するための手段】

本発明は、基板上に、光導波路としての機能を有する第1の半導体層を含む下部半導体層、第1の半導体層より高い屈折率を有する光吸收層、第1の半導体層より低い屈折率を有する第2の半導体層を含む上部半導体層を順番に積層し、基板と下部半導体層と光吸收層の少なくとも一つの端面を含む光入射端面から所定角度で入射した光が光吸收層において吸収されることにより生じた電流を、上部半導体層及び下部半導体層をそれぞれ経て電極から外部に出力する半導体受光素子である。

【0045】

さらに、光吸收層に入射した光の一部は光吸收層内と第1の半導体層内との少なくとも一方を第2の半導体層の下面に平行方向に伝搬し、かつ光吸收層に入射した光の他の一部は第2の半導体層の下面で反射し光吸收層内及び第1の半導体層内を斜め方向に伝搬する。

【0046】

このように構成された半導体受光素子においては、第1の半導体層を含む下部半導体層と、第1の半導体層よりも低い屈折率を有する第2の半導体層を含む上部半導体層とで、第1の半導体層よりも高い屈折率を有する光吸收層を挟んでいる。

【0047】

そして、光入射端面に所定角度で光を入射すると、この光は光吸收層を斜めに伝搬し、一部は第2の半導体層の下面で反射する。この反射した光は光吸收層内及び第1の半導体層内を斜め方向に伝搬する。この光吸收層内及び第1の半導体層内を斜め方向に伝搬する過程で、光が光吸收層に直接又はエバネッセント結合にて吸収される。

【0048】

さらに、この発明においては、光吸收層を斜めに伝搬した光の一部は、第2の半導体層の下面で反射せずに、すなわち光吸收層及び第1の半導体層内を斜め下方に伝搬せずに、光吸收層内又は第1の半導体層内を第2の半導体層の下面に平行方向に伝搬する。したがって、この光は、光吸收層の長さの全体を有效地に利用し

て吸収され、電流に変換されるので、半導体受光素子としての帯域の許す限り、光吸収層の長さを長くすることにより受光感度を高めることが可能である。

【0049】

また、本発明の半導体受光素子においては、斜め下から光吸収層の下面の広い領域に渡って光を照射する。したがって、光導波路型の半導体受光素子や薄い装荷光導波路を有する装荷光導波路型の半導体受光素子と異なり、光吸収層のある特定の一部分への電流集中が発生しないため、ジュール熱による素子破壊を避けすることが可能である。

【0050】

また、光のパワーの大きな部分を斜め下から光吸収層に直接照射でき、かつ光の一部を光吸収層や第1の半導体層に伝搬させ、吸収させてるので、厚い装荷光導波路を有する装荷光導波路型の半導体受光素子や端面屈折型の半導体受光素子と比較して、受光感度が高く、結果的に短い光吸収長で済むのでC.R.時定数から制限される帯域が広い。

【0051】

さらに、第1の半導体層の厚みは入射する光の直径よりも小さくても良いので、半導体製造時における結晶成長への負担が小さく、半導体受光素子としての製作性が良く、優れた特性の半導体受光素子を実現できる。

【0052】

また別の発明は、上述した発明の半導体受光素子における光入射端面と光吸収層の下面とのなす角度を90度に設定している。

【0053】

また別の発明は、上述した発明の半導体受光素子における光入射端面と光吸収層の下面とのなす角度を、90度未満で、かつ光入射端面を構成する材料の結晶方位で定まる角度に設定している。

【0054】

また別の発明は、上述した発明の半導体受光素子における光入射端面と光吸収層の下面とのなす角度を、90度未満で、かつ光入射端面を構成する材料の結晶方位で定まる角度より大きな角度に設定している。

【0055】

また別の発明は、上述した発明の半導体受光素子における第1の半導体層を4元組成の半導体材料で構成している。

【0056】

また別の発明は、上述した発明の半導体受光素子における光入射端面に入射する光にとって、下部半導体層の等価屈折率が前記上部半導体層の屈折率よりも高くなるように、下部半導体層は屈折率の高い層と低い層の組合せで構成している。

【0057】

また別の発明は、上述した発明の半導体受光素子における下部半導体層がn型の半導体材料で構成され、上部半導体層がp型の半導体材料で構成されている。

【0058】

また別の発明は、上述した発明の半導体受光素子における下部半導体層がp型の半導体材料で構成され、上部半導体層がn型の半導体材料で構成されている。

【0059】

また別の発明は、上述した発明の半導体受光素子における光の光入射端面に対する入射位置と入射角度との少なくとも一方を調整することにより、この入射した光が光吸収層に照射されるようにしている。

【0060】

【発明の実施の形態】

以下、本発明の各実施形態を図面を用いて説明する。

(第1実施形態)

図1は本発明の第1実施形態に係わる半導体受光素子の概略構成を示す横断面図である。図19に示す従来の半導体受光素子と同一部分には同一符号を付して、重複する部分の詳細説明を省略する。

【0061】

半絶縁性InP(SI-InP)材料で形成された基板11上に、n-InGaAsPからなる光導波路層15、i-InGaAsからなる光吸収層4、p-InPからなる上部クラッド層3、p⁺-InGaAsからなるコンタクト層2が積層されている。そして、このコンタク

ト層2の上側に電流を取出すためのp電極1を取付け、n-InGaAsPからなる光導波路層15に同じく電流を取出すためのn電極7を取付けている。さらに、基板11の下側に配置されたくさび型の台座16にて、半導体受光素子は傾斜されている。なお、n-InGaAsPからなる光導波路層15は、電流を取出すためのn電極7に対するオーミックコンタクト層の機能をも有する。

【0062】

そして、この半導体受光素子においては、基板11と光導波路層15と光吸收層4の少なくとも1つの端面で形成される光入射端面12と光吸收層4の下面とのなす角度は90度に設定されている。具体的には、光入射端面12をへき開で形成している。

【0063】

このような構成の半導体受光素子において、n-InGaAsPからなる光導波路層15が下部半導体層を構成する第1の半導体層を構成し、p-InPからなる上部クラッド層3が上部半導体層を構成する第2の半導体層を構成している。

【0064】

さらに、この第1実施形態の半導体受光素子における、上部クラッド層3、光吸收層4、光導波路層15、基板11の各屈折率 n_3 、 n_4 、 n_{15} 、 n_{11} の大小関係は、 $n_3 (=3.17) = n_{11} (=3.17) < n_{15} (=3.35) < n_4 (=約3.6)$ に設定されている。

【0065】

このように構成された第1実施形態の半導体受光素子の動作原理を図2、図3を用いて説明する。

【0066】

この半導体受光素子においては、光吸收層4の上方の上部クラッド層3よりも屈折率の高い例えはバンドギャップ波長が1.2μmの光導波路層15と基板11のうち、光が少なくとも光導波路層15の端面に入射すると、この入射光はその高い屈折率を感じる。したがって、入射光にとっての等価屈折率 n_e は基板11よりも高くなる。ここで、上部クラッド層3の屈折率 n_3 と基板11の屈折率 n_{11} は上述したようにほぼ等しいため、結果的に入射光にとっての等価屈折率 n

eを上部クラッド層3よりも高くすることができる。

【0067】

光導波路層15と光吸收層4との界面において成立するスネルの式は

$$n_e \sin \theta_{15} = n_4 \sin \theta_4 \quad \cdots (4)$$

となる。また、光吸收層4と上部クラッド層3との界面において

$$n_4 \sin \theta_4 = n_3 \quad \cdots (5)$$

つまり、(5)式を(4)式に代入して得られる(6)式

$$n_e \sin \theta_{15} = n_3 \quad \cdots (6)$$

が成立すれば、その界面において全反射が生じる。

【0068】

そのためには、光導波路層15と基板11の屈折率 n_{15} 、 n_{11} を考慮し、光に少なくとも光導波路層15の高い屈折率を感じさせるとともに、光の入射角を適切に選ぶことが重要となる。

【0069】

光導波路層15を光が伝搬できる装荷光導波路として機能できるように設計するとともに、図2で示す上部クラッド層3に対する入射角 θ_4 が光の全反射が起きる臨界角以上となるように設定すると、光吸收層4と上部クラッド層3との界面において光吸收層4を斜めに伝搬する反射光の他に、水平方向に伝搬する水平伝搬光が発生する。

【0070】

図3は、上述した条件で光を光入射端面12から入射させた場合における半導体受光素子内の光強度分布図である。光吸收層4と上部クラッド層3との界面で反射されて光吸收層4及び光導波路層15を斜め右下方向に伝搬する反射光の他に、光吸收層4内を水平方向に伝搬する水平伝搬光が存在することが確認できる。

【0071】

したがって、光を効率良く、光吸收層4内及び光導波路層15内を伝搬させることが可能となる。この光吸收層4内及び光導波路層15内を伝搬する光は光吸收層4により吸収され、電流に変換される。

【0072】

図4に、試作した第1実施形態の半導体受光素子における特性の測定結果を示す。縦軸は測定された受光感度(A/W)であり、横軸は光吸收層4の長さである。この図4の測定結果から理解できるように、光吸收層4の長さが $30\mu m$ 以上でも受光感度が改善されている。なお、試作した各半導体受光素子はその光吸收層4の厚みTは $0.5\mu m$ であり、光導波路層15の厚みDが $2.0\mu m$ である。なお、水平からの光の入射角は 40° である。

【0073】

図5に示すように、光導波路層15の下端から光が入射した場合に、光吸收層4と上部クラッド層3との界面で光が1回反射した後、光吸收層4を抜けてしまうと仮定した場合の光吸收層4の長さL_{max}は $20\mu m$ よりかなり短い。ところが、前述のように光吸收層4の長さが $30\mu m$ 以上でも受光感度が改善されている。

【0074】

このことは、光吸收層4と上部クラッド層3との界面で反射された光の他に、光吸收層4や光導波路層15の長さ方向に伝搬する光の成分があり、それが光吸收層4に吸収されるためと考えられる。

【0075】

このように、第1実施形態の半導体受光素子は、図20に示した従来の半導体受光素子と異なり、半導体受光素子としての帯域の許す限り、光吸收層4の長さを長くすることにより受光感度を高めることが可能である。

【0076】

また、斜め下から光吸收層4の下面の広い領域に渡って光を照射するので、図13の光導波路型の半導体受光素子や、図15の薄い装荷光導波路9を有する装荷光導波路型の半導体受光素子と異なり、光吸收層4のある特定の一部分への電流集中が発生しない。その結果、ジューク熱による素子破壊を避けることが可能となる。

【0077】

また、光のパワーの大きな部分を斜め下から光吸收層4に直接照射でき、かつ

光の一部を光吸收層4や光導波路層15に伝搬させて吸収させてるので、図15の厚い装荷光導波路を有する装荷光導波路型の半導体受光素子や、図19、図20の端面屈折型の半導体受光素子と比較して、受光感度が高く、結果的に短い光吸収長で済むのでC.R.時定数から制限される帶域が広い。

【0078】

さらに、光導波路層15の厚みTは入射する光の直径よりも小さくても良いので、結晶成長への負担が小さく、半導体受光素子としての製作性が良い。なお、以下に記述する第2～第8の各実施形態の半導体受光素子においてもこれらの特長を有している。

【0079】

さらに、図1に示したように、上部クラッド層3と光吸收層4の界面において斜め下向きに反射された光は、屈折率の高い光導波路層15と屈折率の低い基板11の界面において再度斜め上向きに反射され、光吸收層4において再度吸収されることを繰り返し、受光感度向上に寄与する。なお、以下に記述する第2～第8の各実施形態の半導体受光素子においてもこれらの特長を有している。

【0080】

(第2実施形態)

図6は本発明の第2実施形態に係わる半導体受光素子の概略構成を示す横断面図である。図1に示す第1実施形態の半導体受光素子と同一部分には同一符号を付して、重複する部分の詳細説明を省略する。

【0081】

この第2実施形態の半導体受光素子においては、図1に示す第1実施形態の半導体受光素子における台座16の代りに、半導体受光素子を水平に保持する筐体17を設け、光ファイバ18から基板11と光導波路層15と光吸收層4の少なくとも1つの端面で形成される光入射端面12に光を傾斜させて入射させている。

【0082】

このように構成された半導体受光素子において、光ファイバ18から光入射端面12に入射した光はこの光入射端面12で屈折され、光導波路層15を経由し

て上方に位置する光吸收層4に斜め下から入射し、吸収される。

【0083】

この第2実施形態の半導体受光素子においても、光導波路層15の屈折率 n_{15} を光吸收層4の上に位置する上部クラッド層3の屈折率 n_3 より高くすることにより、上部クラッド層3と光吸收層4との界面において光を反射させるとともに、入射した光の一部を光吸收層4内や光導波路層15内に伝搬させている。そのため、光の反射や光の水平方向の伝搬を光吸収に利用するので実効的な吸収長は長くなり、光受光素子としての感度が大幅に改善される。

【0084】

(第3実施形態)

図7は本発明の第3実施形態に係わる半導体受光素子の概略構成を示す横断面図である。図6に示す第2実施形態の半導体受光素子と同一部分には同一符号を付して、重複する部分の詳細説明を省略する。

【0085】

この第3実施形態の半導体受光素子においては、図6に示す第2実施形態の半導体受光素子における筐体17と基板11との間にくさび型の台座16を介在させて、光入射端面12を傾斜させている。

【0086】

このように、光入射端面12を傾斜させることによって、光ファイバ18から出力される入射光と半導体受光素子の光入射端面12とのなす角度が小さくなり、所望の角度が容易に実現できる利点がある。

【0087】

この第3実施形態の半導体受光素子においても、光が入射した光導波路層15の屈折率 n_{15} を光吸收層4の上に位置する上部クラッド層3の屈折率 n_3 より高くすることにより、上部クラッド層3と光吸收層4との界面において光を反射させるとともに、その入射した光の一部を光吸收層4内や光導波路層15内に伝搬させている。そのため、光の反射や光の水平方向の伝搬を光吸収に利用するので実効的な吸収長は長くなり、光受光素子としての感度が大幅に改善される。

【0088】

(第4実施形態)

図8は本発明の第4実施形態に係わる半導体受光素子の概略構成を示す横断面図である。図1に示す第1実施形態の半導体受光素子と同一部分には同一符号を付して、重複する部分の詳細説明を省略する。

【0089】

この第4実施形態の半導体受光素子においては、基板11とn-InGaAsPからなる光導波路層15と光吸收層4の少なくとも1つの端面を含む光入射端面12を、図19、図20に示した従来の半導体受光素子と同様に、ウェットエッティングで形成している。したがって、光入射端面12と光吸收層4の下面とのなす角度は、結晶方位で定まる約54度である。さらに、光吸收層4への小さな入射角を実現するために、台座16を用いて受光素子全体を傾斜させている。

【0090】

さらに、この第4実施形態の半導体受光素子は、図19、図20に示した従来の半導体受光素子によく似てはいるが、第1、第2、第3実施形態の各半導体受光素子と同様に、光が入射した光導波路層15の屈折率 n_{15} を光吸收層4の上に位置する上部クラッド層3の屈折率 n_3 より高くすることにより、上部クラッド層3と光吸收層4との界面において光を反射させるとともに、その入射した光の一部を光吸收層4内や光導波路層15内に伝搬させている。そのため、光の反射や光の水平方向の伝搬を光吸收に利用するので実効的な吸収長は長くなり、光受光素子としての感度が大幅に改善される。

【0091】

(第5実施形態)

図9は本発明の第5実施形態に係わる半導体受光素子の概略構成を示す横断面図である。図8に示す第4実施形態の半導体受光素子と同一部分には同一符号を付して、重複する部分の詳細説明を省略する。

【0092】

この第5実施形態の半導体受光素子においては、基板11とn-InGaAsPからなる光導波路層15と光吸收層4の少なくとも1つの端面を含む光入射端面12を、図8に示した第4実施形態の半導体受光素子と同様に、ウェットエッティングで

形成している。しかし、このこの第5実施形態においては、ウェットエッチング時間を規定時間より短く設定している。

【0093】

したがって、光入射端面12と光導波路層15の上面（光吸收層4の下面）とのなす角度は、90度未満でかつ結晶方位で定まる約54度より大きな角度である。なお、54度より大きな角度は結晶方位を選択することによっても実現できる。その結果、図8の第4実施形態では必要であった台座16が不要となり、実装が容易となる。

【0094】

さらに、この第5実施形態の半導体受光素子においても、第4実施形態の半導体受光素子と同様に、上部クラッド層3よりも高い屈折率を有する光導波路層15を用いることにより、光の反射や光の水平方向の伝搬を光吸收に利用するので実効的な吸収長は長くなり、光受光素子としての感度が大幅に改善される。

【0095】

（第6実施形態）

図10は本発明の第6実施形態に係わる半導体受光素子の概略構成を示す横断面図である。図1に示す第1実施形態の半導体受光素子と同一部分には同一符号を付して、重複する部分の詳細説明を省略する。

【0096】

この第6実施形態の半導体受光素子においては、n-InGaAsPからなる複数の光導波路層15と、n-InPからなる複数の下部クラッド層19を交互に組合わせることにより、この光受光素子に光が入射する際に、この光が等価的に感じる屈折率をp-InPからなる上部クラッド層3の屈折率よりも大きくしている。

【0097】

このように、基板11と光吸收層4との間に存在する下部半導体層を、互いに異なる材料で多層構造とすることにより、基板11上に光導波路層15及び下部クラッド層19を含む下部半導体層を結晶成長で形成していく製造工程における結晶性の改善による製造効率を向上させることが可能である。

【0098】

(第7実施形態)

図11は本発明の第7実施形態に係わる半導体受光素子の概略構成を示す横断面図である。図7に示す第3実施形態の半導体受光素子と同一部分には同一符号を付して、重複する部分の詳細説明を省略する。

【0099】

この第7実施形態の半導体受光素子においては、レンズホルダ20にレンズ21が固定されており、光ファイバ18はホルダ22の中に入っている。本来は、光ファイバ18はフェルールに固定した後、ホルダ22に入れるが、簡単のためここではフェルールを省略した。レンズホルダ20とフェルール、すなわち光ファイバ18の相対的な位置関係を設定することにより、入射光が光入射端面12に入射する際の位置と傾きの少なくとも一方を調整できるので、ひいては入射光を効率良く光吸収層4に照射できる。

【0100】

なお、この第7実施形態の半導体受光素子は図7に示した第3の実施形態を応用したが、台座16を用いない実施形態を含め他の各実施形態にも応用できることは勿論である。

【0101】

(第8実施形態)

図12は本発明の第8実施形態に係わる半導体受光素子の概略構成を示す横断面図である。図1に示す第1実施形態の半導体受光素子と同一部分には同一符号を付して、重複する部分の詳細説明を省略する。

【0102】

この第8実施形態の半導体受光素子においては、光入射端面12を構成する光導波路層4及び基板11の端面の位置を、コンタクト層2、上部クラッド層3及び光吸収層4の端面の位置に比較して、入射光側に移動させている。

【0103】

このような構成においても、光入射端面12から入射した光が前述した条件で光吸収層4へ入射して、上部クラッド層3と光吸収層4との界面において光を反射させるとともに、その入射光の一部を光吸収層4内や光導波路層15内に伝搬

させることができるので、第1実施形態の半導体受光素子とほぼ同様の効果を奏することが可能である。

【0104】

なお、本発明は上述した各実施形態に限定されるものではない。

すなわち、上述した各実施形態においては、光導波路層15の材料として、n-InGaAsPを採用したが、このn-InGaAsPの代わりに、p-InPからなる上部クラッド層3よりも屈折率が高い他の全ての材料を使用できる。例えば、バンドギャップ波長が1.2μm以外のn-InGaAsPやその他n-InGaAlAs、n-InAlAsなどを用いても良いことは言うまでもない。

【0105】

さらに、上述した各実施形態においては、光吸收層4と上部クラッド層3の界面において光は反射あるいは水平伝搬されたが、発生したキャリアが無駄になるコンタクト層2に光が入射する前に反射あるいは水平伝搬されるような層構成であればよいと考えられる。このような層構成の1例としては、光吸收層4の上にp-InGaAsP（あるいはi-InGaAsP、p-InGaAlAsやi-InGaAlAs）のように屈折率がInPよりも高い層を形成し、その上にp-InPを形成した構造が考えられる。

【0106】

また、入射光と光入射端面12のなす角度についても、各実施形態の半導体受光素子で説明した数値のみでなく、本発明の原理が成り立つ限り、その他の角度でもよいことはいうまでもない。

【0107】

なお、上述した各実施形態においては、光吸收層4の下にn-InPからなる下部クラッド層5がないと仮定したが十分に薄ければ介在させても差し支えない。

【0108】

また、上述した各実施形態において、光を半導体受光素子に結合（入射）させるには、先球ファイバ、平面ファイバなどの他、レンズ系を用いても良いことは言うまでもないし、使用波長は1.55μmのみでなく、その他の波長でも良いことは言うまでもない。さらに、光吸收層4の材料としては、上述したi-InGaAsの他に、3元混晶p-InGaAsや、p-InGaAsP、p-InGaAlAsなどの4元混晶のほか、各

種多重量子井戸でも良いことは言うまでもない。

【0109】

上述した各実施形態においては、光吸收層4がハイメサ構造となっているが、半絶縁性InPやpn埋め込みの構造としても良いし、基板11としては主に半絶縁性InPを想定して説明したが、勿論n⁺-InPでも良い。

【0110】

また、高濃度のnタイプの半導体は屈折率がやや小さくなることを利用して、光吸收層4の上にn型もしくはn⁺型の半導体層を、光吸收層の下にp型もしくはp⁺型の半導体層を形成してもよい。例えば、光吸收層の上にn⁺-InPの上部クラッド層を形成することが考えられる。

【0111】

その場合には、上述した各実施形態において、コンタクト層2をn⁺-InGaAsで形成し、上部クラッド層3をn⁺-InPで形成し、下部クラッド層5をp-InP（但し、この層はあってもなくても良い）で形成し、光導波路層15を、p-InPあるいはp⁺-InPとしても良いし、p-InGaAsPあるいはp⁺-InGaAsPなど屈折率を高めることができればどの材料でも良いことは言うまでもない。さらに、基板11として、p⁻-InPあるいはp⁺-InPを使用しても良い。

【0112】

さらに、オーミックコンタクトを実現する際のアロイ化のために、p⁺-InGaAsからなるコンタクト層2は結晶性が劣化するとともに、p電極1とコンタクト層2の界面も平滑性が極めて悪い。

【0113】

ところが、本発明では下側から斜め上に向かって伝播する光を半導体層の界面において反射あるいは水平伝搬させており、基本的に、光はこれらコンタクト層2やp電極1とコンタクト層2の界面には達しないので光電変換に寄与しないキャリアや光の散乱損失を生じることがなく、光電変換の効率が極めて良い。

【0114】

なお、斜め下から斜め上方に向かって伝搬する光のごく一部が上部クラッド3側に染み出したとしても本発明の範囲と考えられる。

【0115】

また、光導波路層15を光吸收層4の上側に位置させる等の、これまでの各実施形態の構造を上下逆にしても本発明として機能することは言うまでもない。

【0116】

【発明の効果】

以上説明したように、本発明の半導体受光素子においては、光吸收層を取り巻く各層の屈折率及び入射光の入射角を調整することによって、光吸收層に入射された光の一部を光吸收層内と第1の半導体層内との少なくとも一方について第2の半導体層の下面に平行方向に伝搬させ、かつ光吸收層に入射された光の他の一部を第2の半導体層の下面で反射し光吸收層内及び第1の半導体層内を斜め方向に伝搬させている。

【0117】

したがって、半導体受光素子に入射した光は、光吸收層内及び第1の半導体層内を伝搬される過程で、光吸收層の一部に集中することなく、光吸收層の広い範囲に亘って直接又はエバネッセント結合にて効率的に吸収され電流に変換される。よって、半導体受光素子の受光感度、耐光入力性、高速応答性、暗電流特性を大幅に向上できる。

【図面の簡単な説明】

【図1】

本発明の第1実施形態に係わる半導体受光素子の概略構成を示す横断面図

【図2】

同第1実施形態に係わる半導体受光素子の動作を説明するための図

【図3】

同第1実施形態に係わる半導体受光素子に入射した光の強度分布を示す図

【図4】

同第1実施形態に係わる半導体受光素子の測定された受光感度特性を示す図

【図5】

同第1実施形態に係わる半導体受光素子の他の動作を説明するための図

【図6】

本発明の第2実施形態に係わる半導体受光素子の概略構成を示す横断面図

【図7】

本発明の第3実施形態に係わる半導体受光素子の概略構成を示す横断面図

【図8】

本発明の第4実施形態に係わる半導体受光素子の概略構成を示す横断面図

【図9】

本発明の第5実施形態に係わる半導体受光素子の概略構成を示す横断面図

【図10】

本発明の第6実施形態に係わる半導体受光素子の概略構成を示す横断面図

【図11】

本発明の第7実施形態に係わる半導体受光素子の概略構成を示す横断面図

【図12】

本発明の第8実施形態に係わる半導体受光素子の概略構成を示す横断面図

【図13】

従来の半導体受光素子の概略構成を示す斜視図

【図14】

同従来の半導体受光素子の問題点を説明するための図

【図15】

他の従来の半導体受光素子の概略構成を示す斜視図

【図16】

同他の従来の半導体受光素子の概略構成を示す横断面図

【図17】

同他の従来の半導体受光素子の動作を説明するための図

【図18】

同他の従来の半導体受光素子の動作特性を示す図

【図19】

従来のさらに別の半導体受光素子の概略構成を示す横断面図

【図20】

従来のさらに別の半導体受光素子の概略構成を示す横断面図

【図21】

同従来半導体受光素子の動作を説明するための図

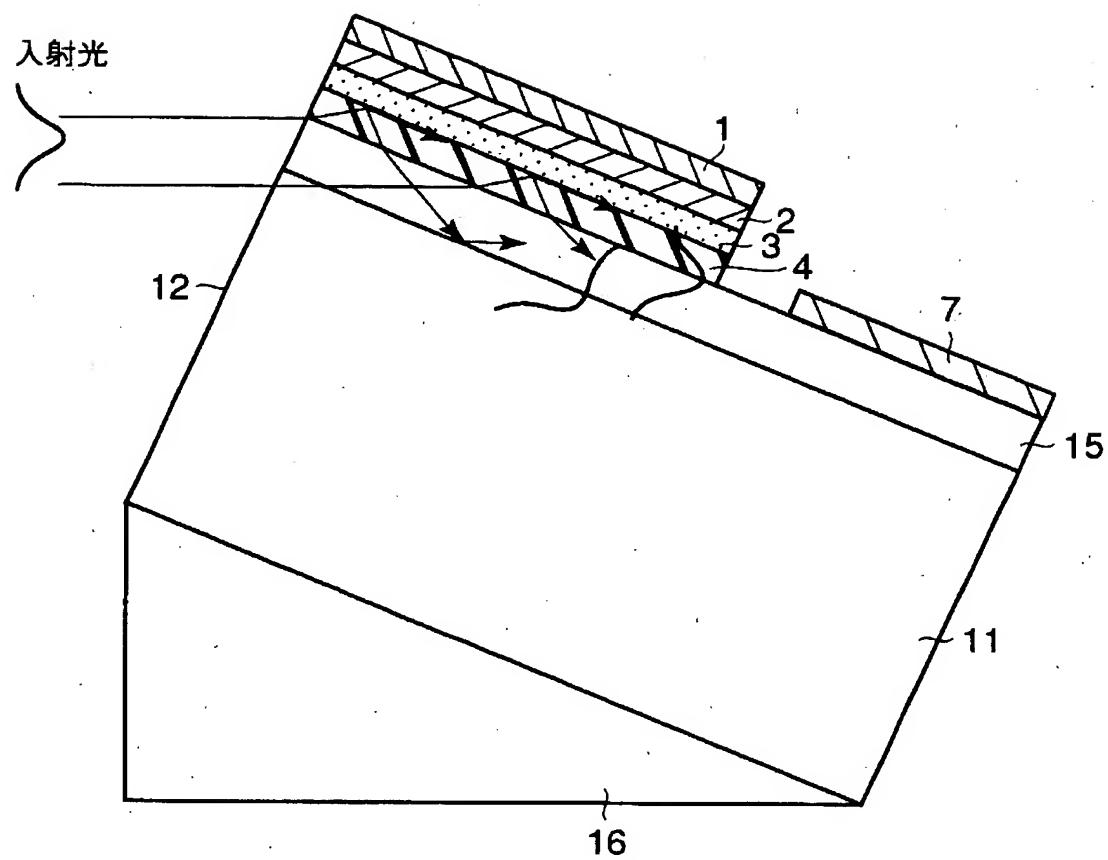
【符号の説明】

- 1 … p電極
- 2 … コンタクト層
- 3 … 上部クラッド層
- 4 … 光吸收層
- 5、 19 … 下部クラッド層
- 6、 11 … 基板
- 7 … n電極
- 8 … ポリイミド
- 9 … 装荷光導波路層
- 12 … 光入射端面
- 15 … 光導波路層
- 16 … 台座
- 17 … 筐体
- 18 … 光ファイバ
- 20 … レンズホルダ
- 21 … レンズ
- 22 … ホルダ

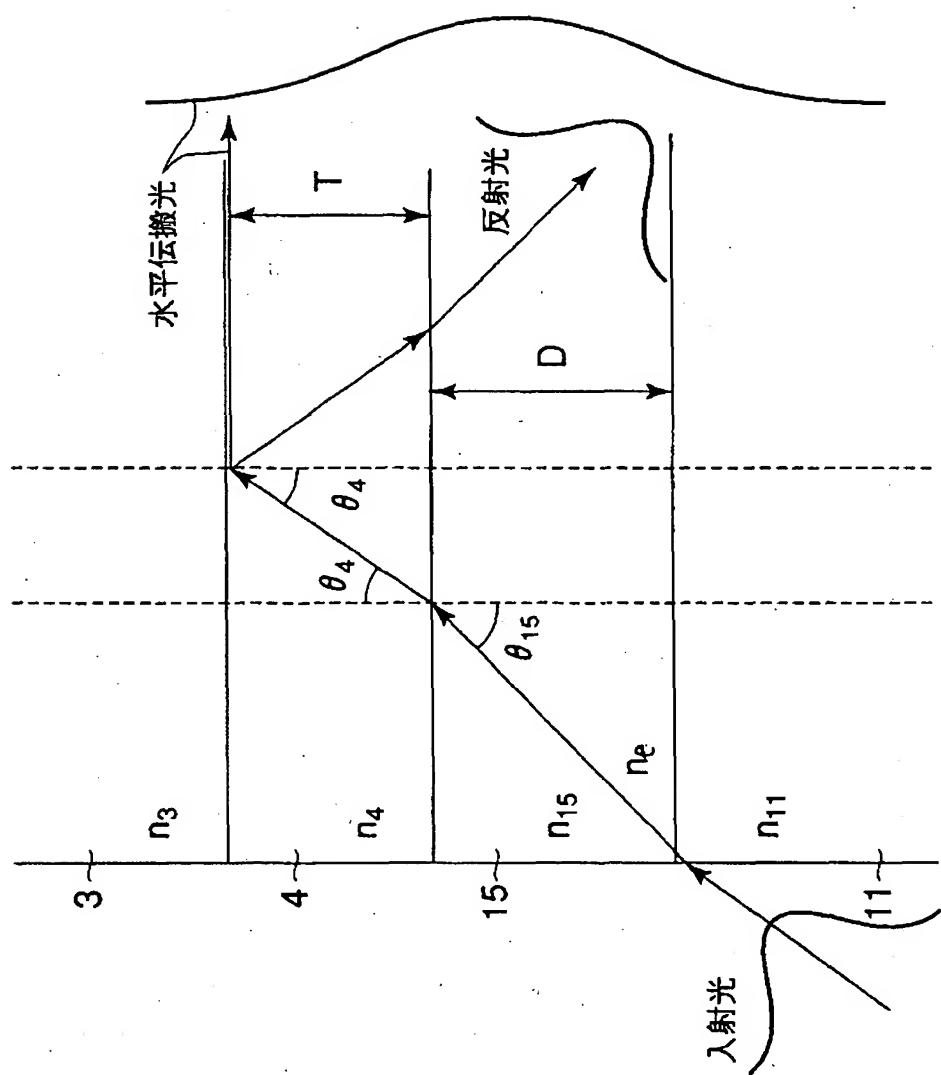
【書類名】

図面

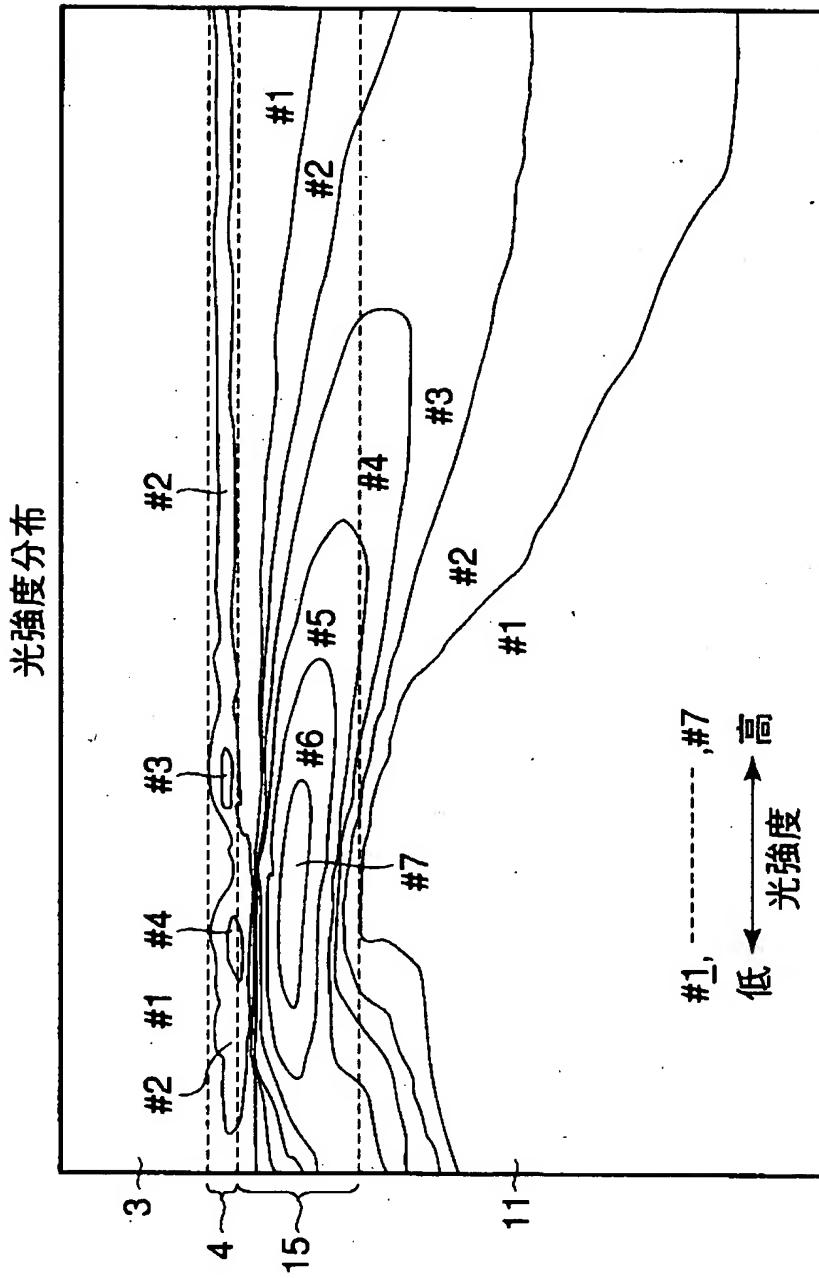
【図1】



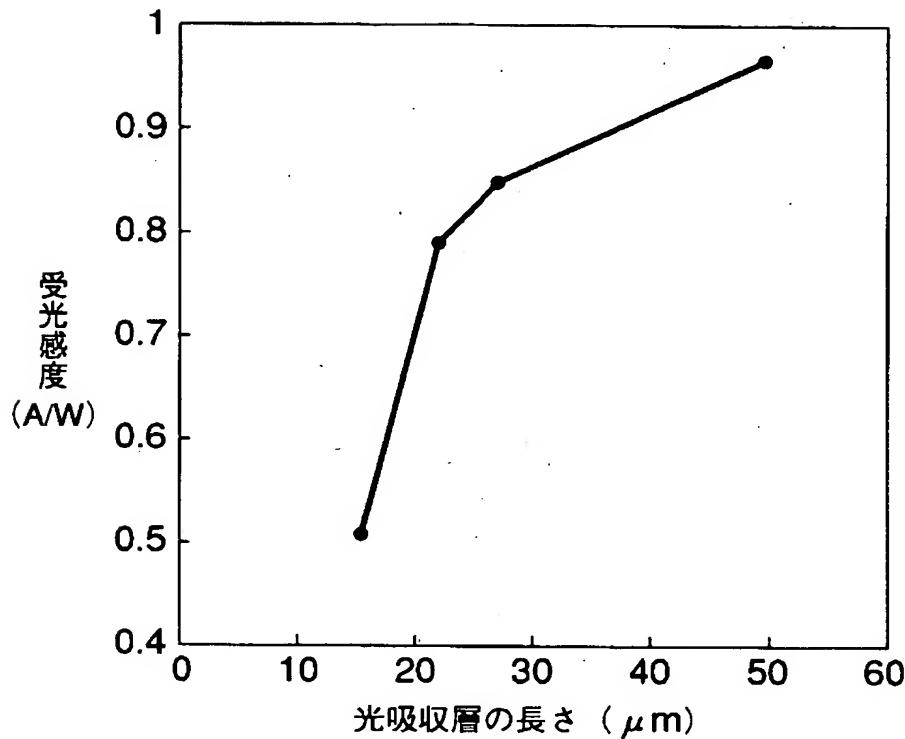
【図2】



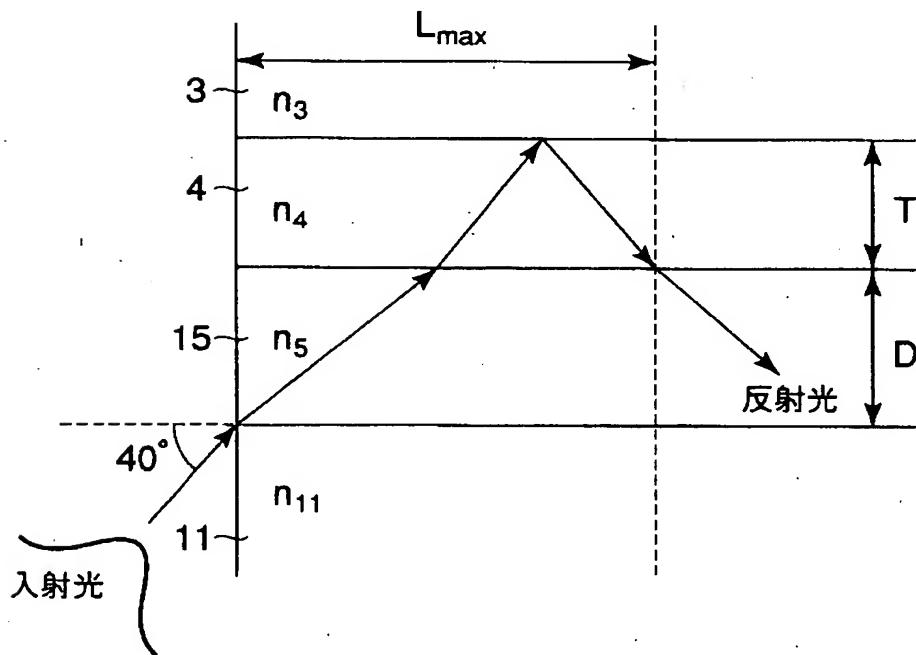
【図3】



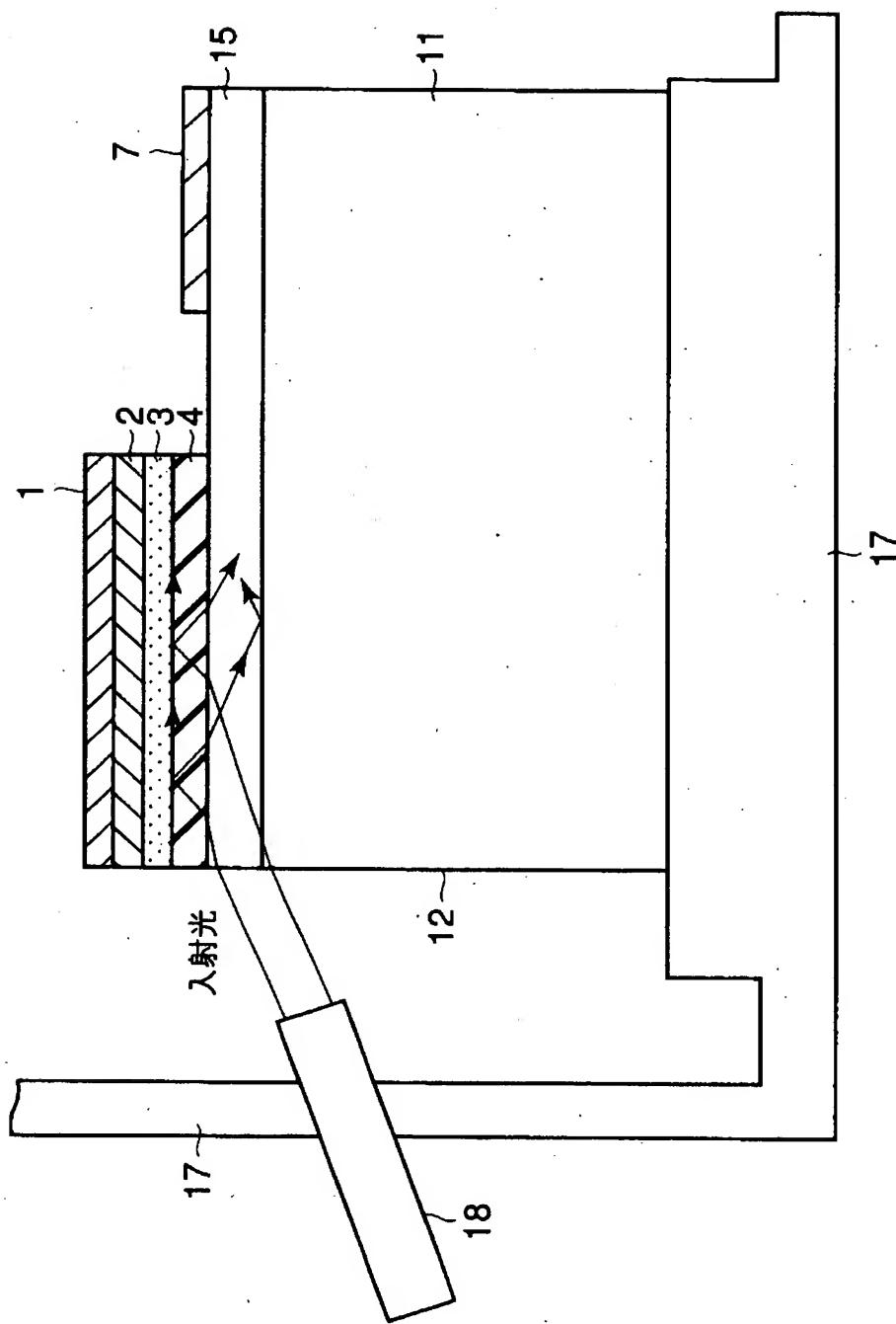
【図4】



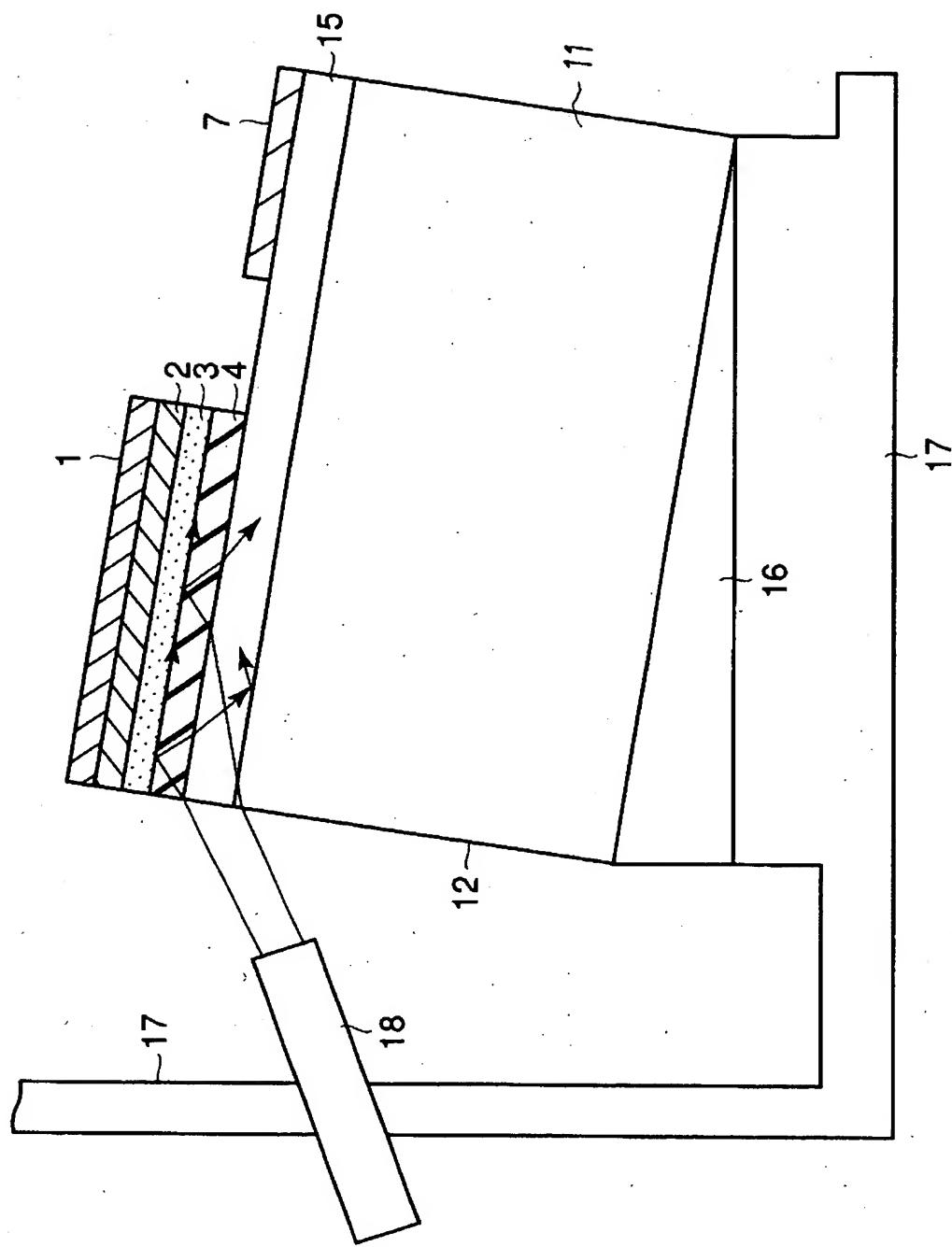
【図5】



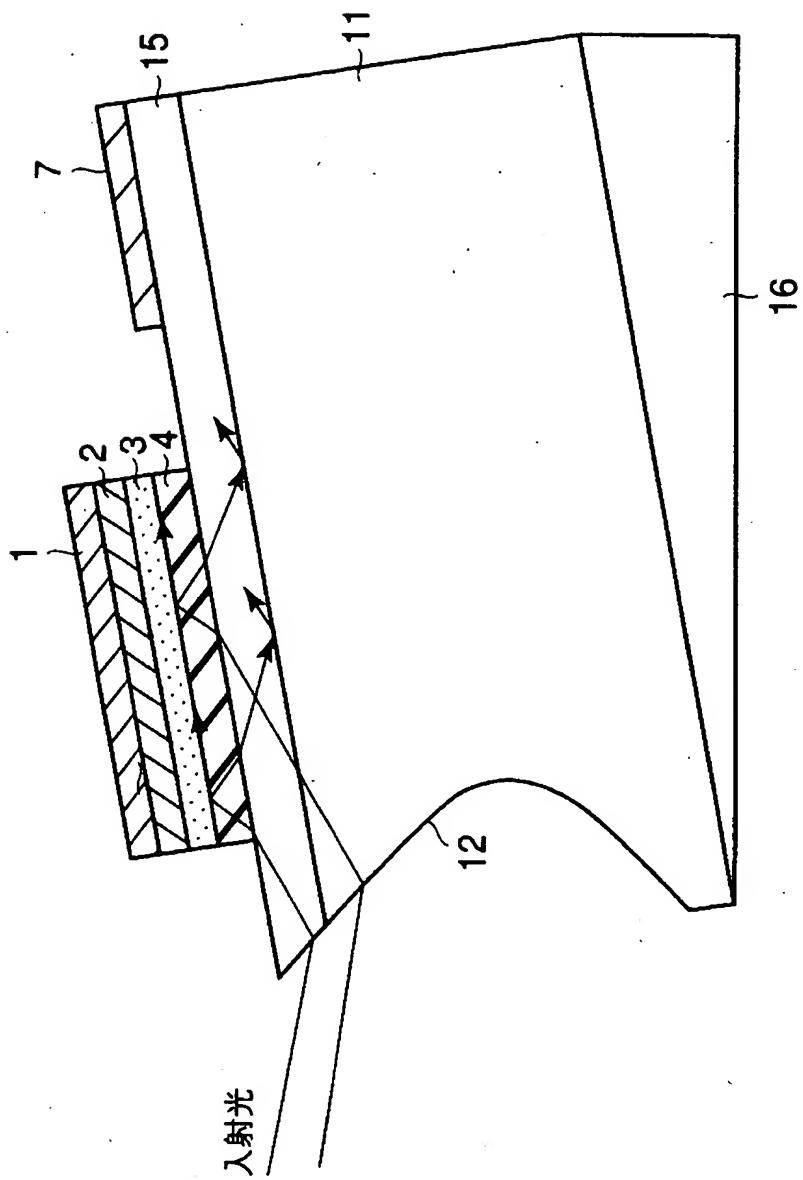
【図6】



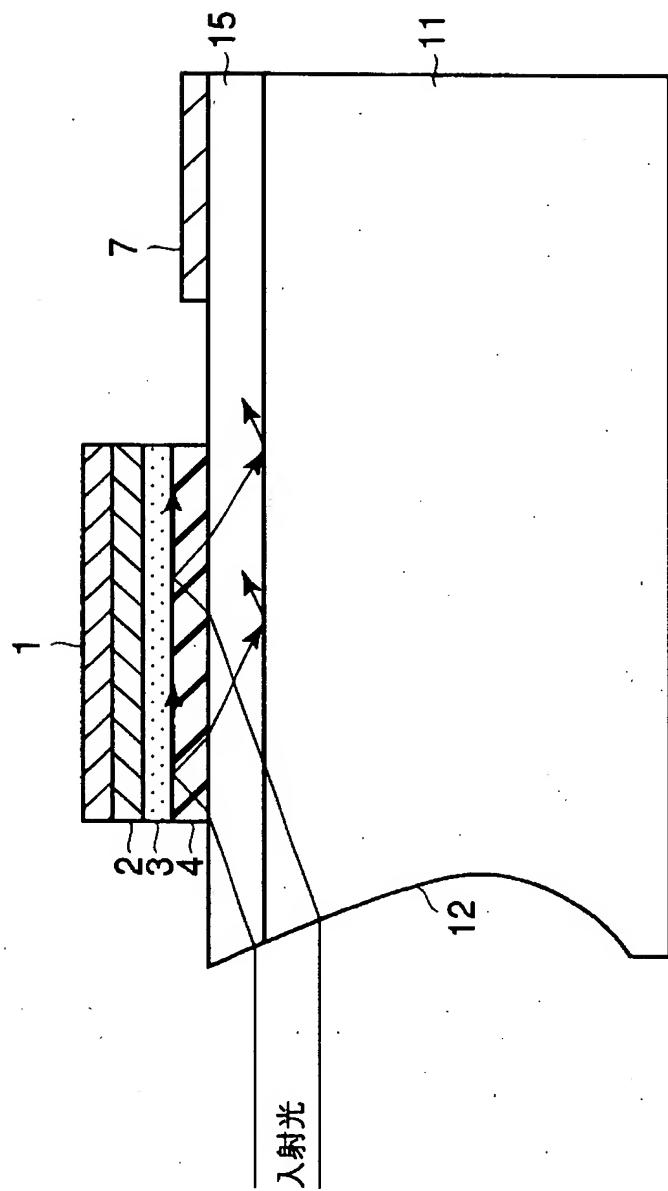
【図7】



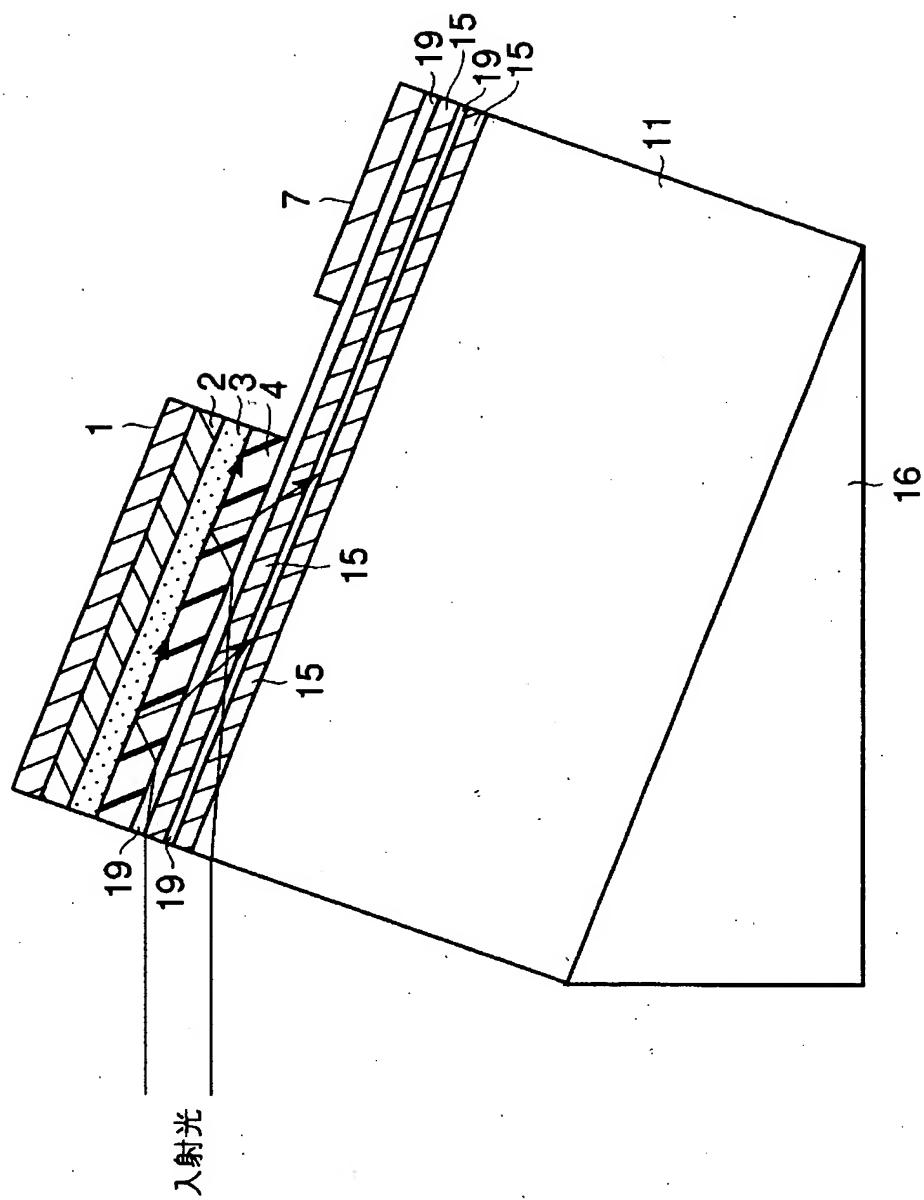
【図8】



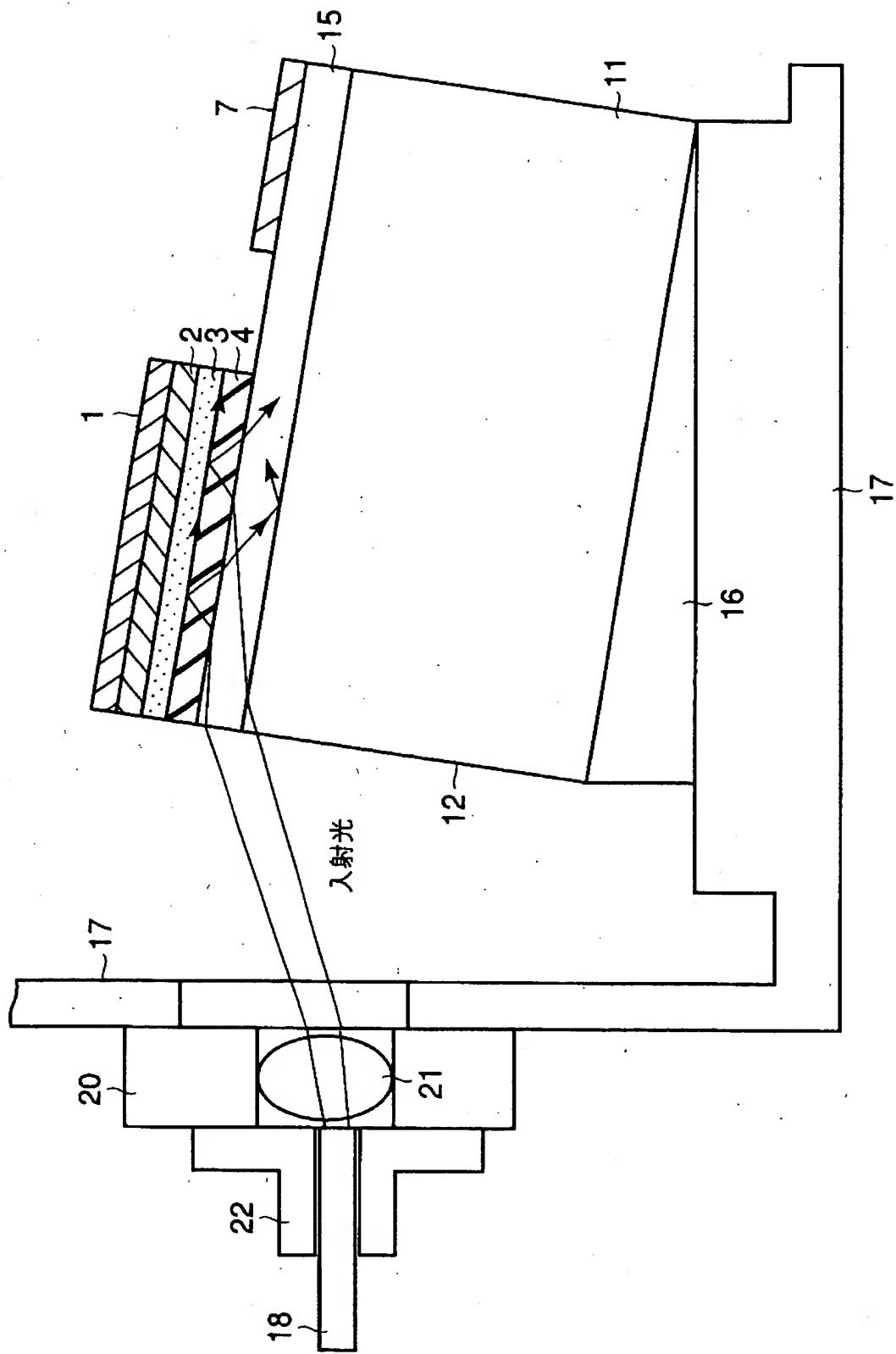
【図9】



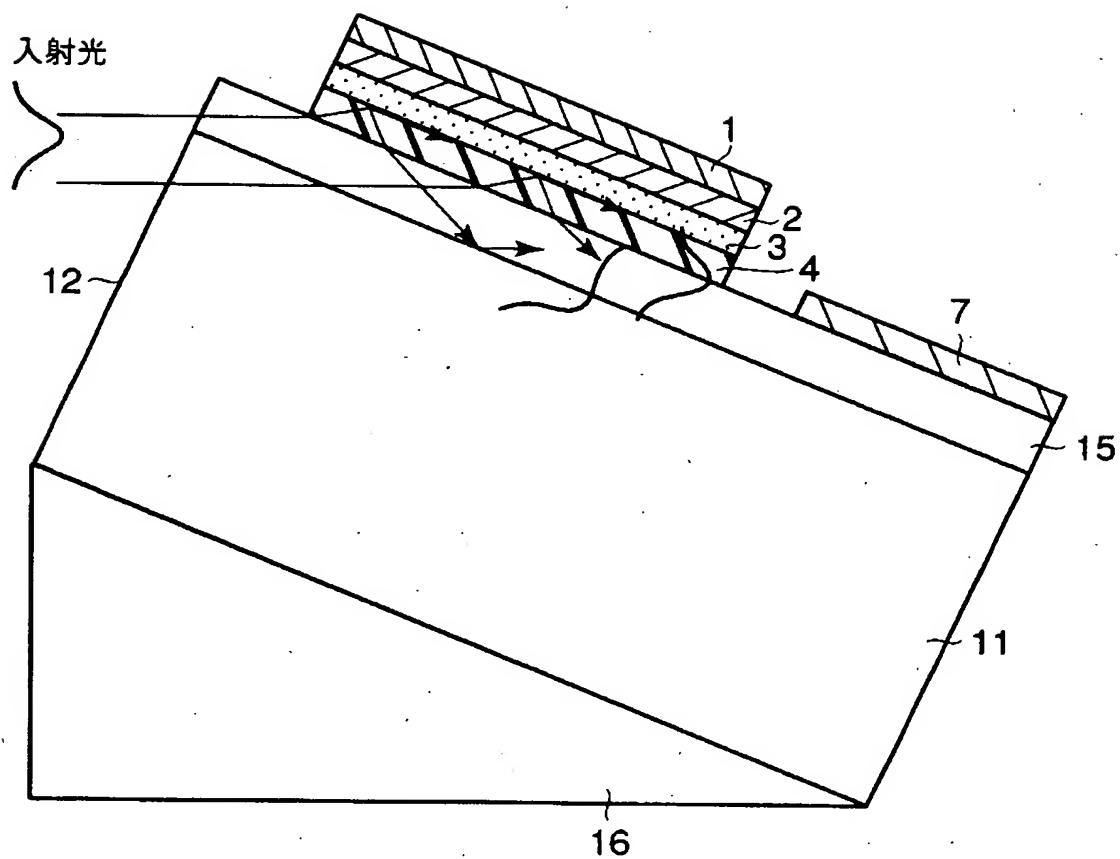
【図10】



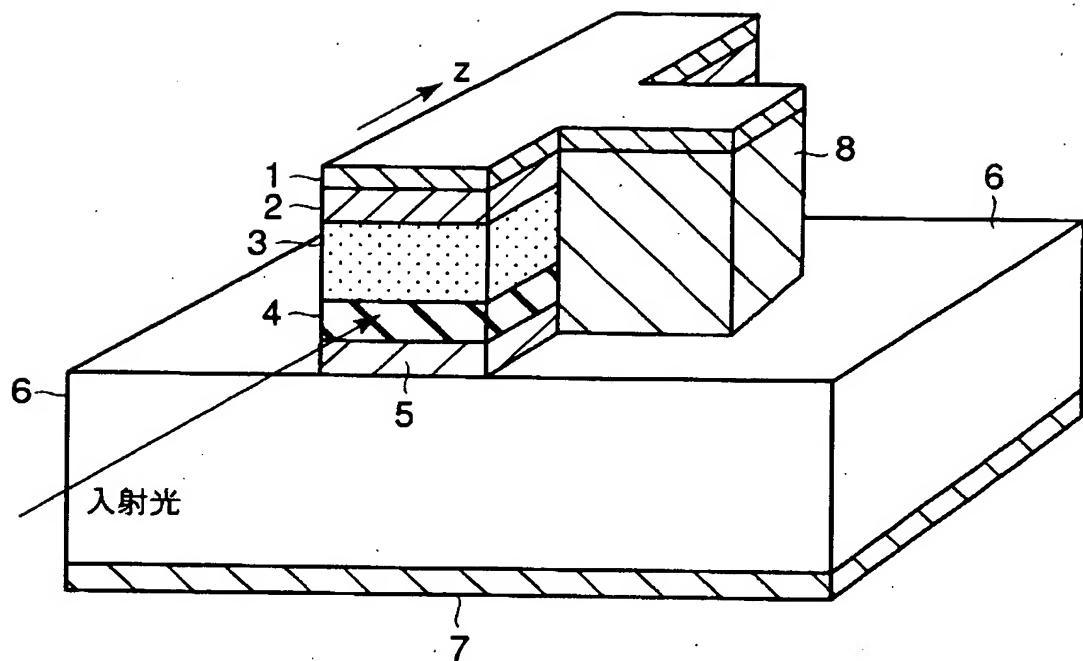
【図11】



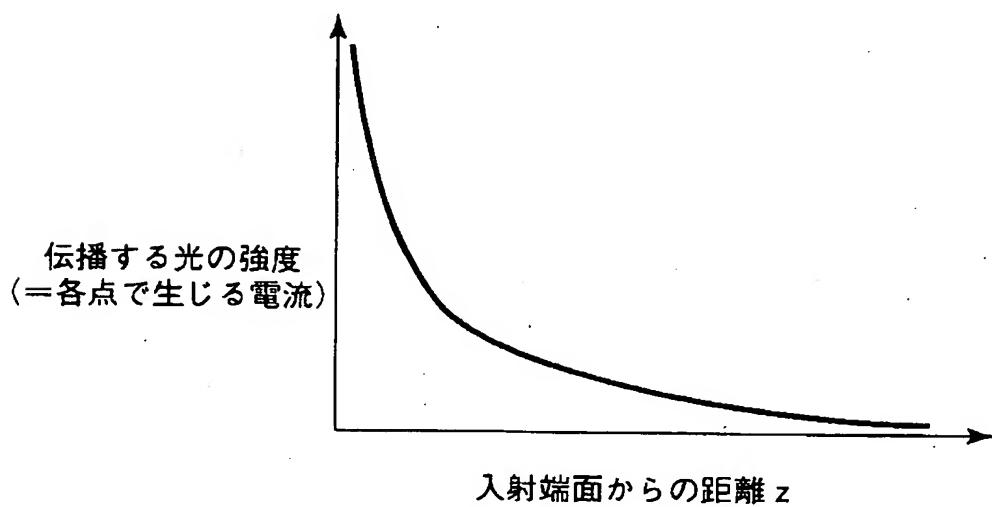
【図12】



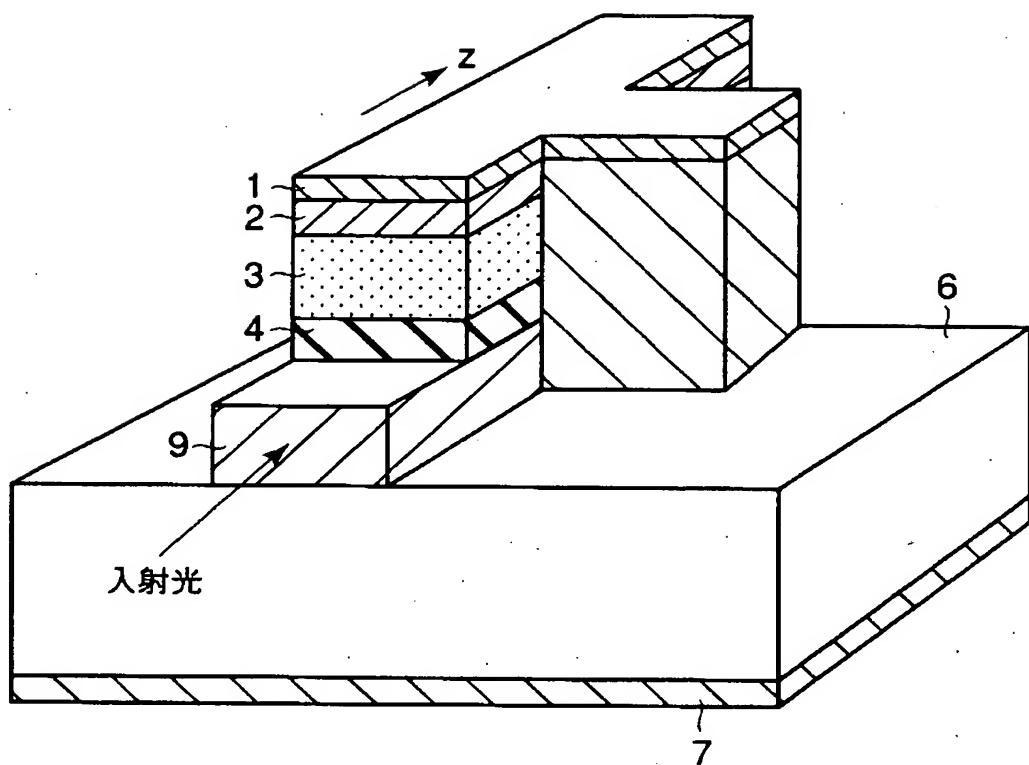
【図13】



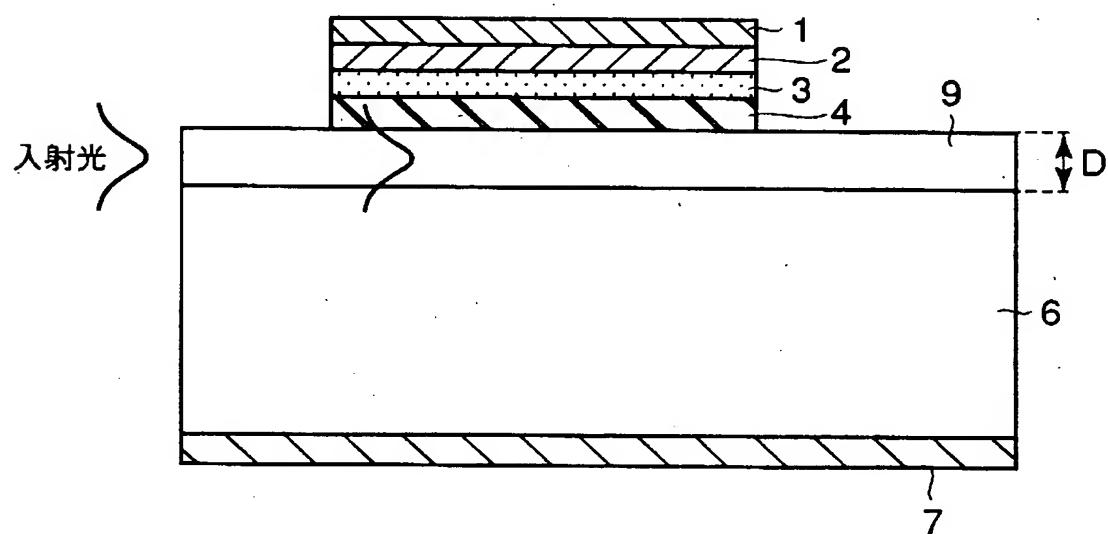
【図14】



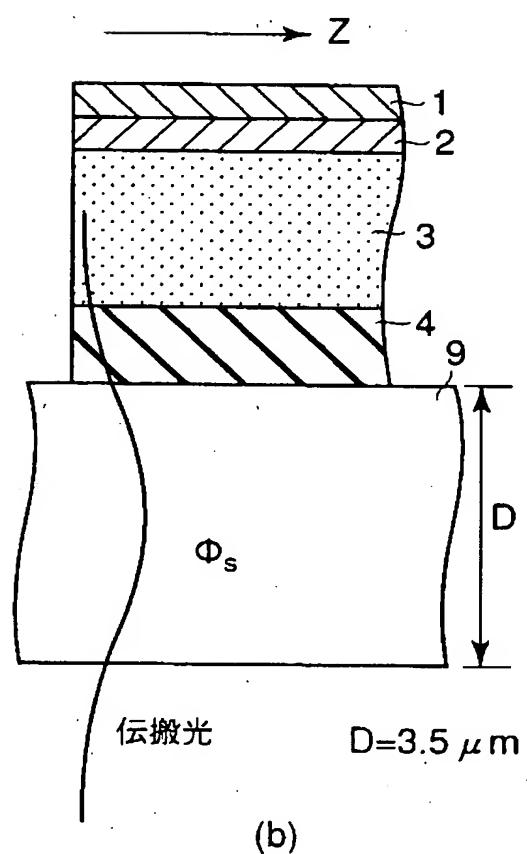
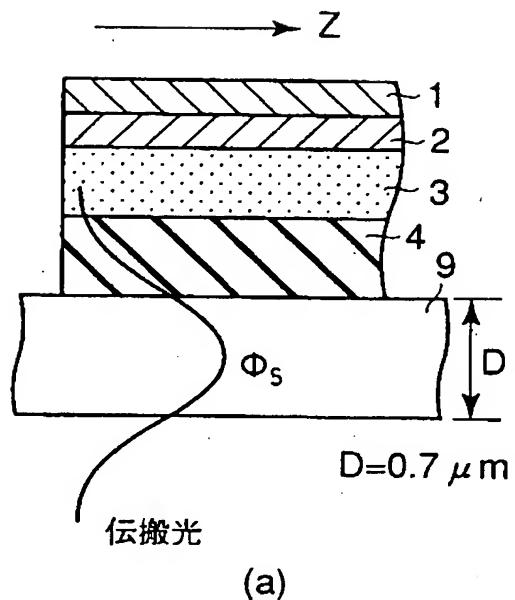
【図15】



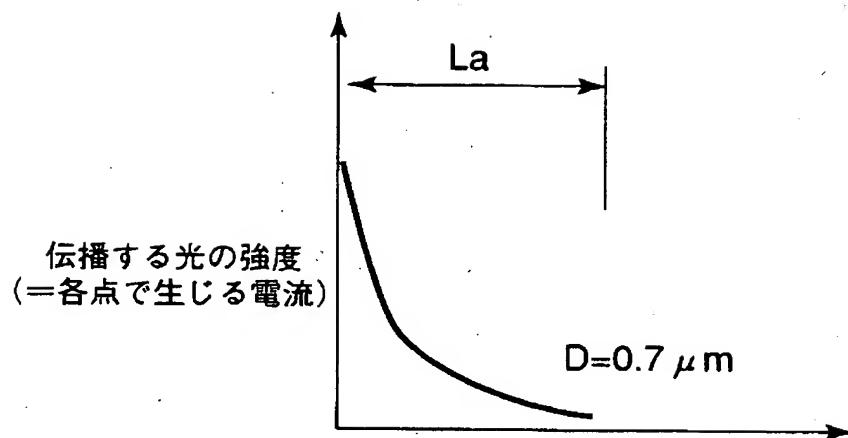
【図16】



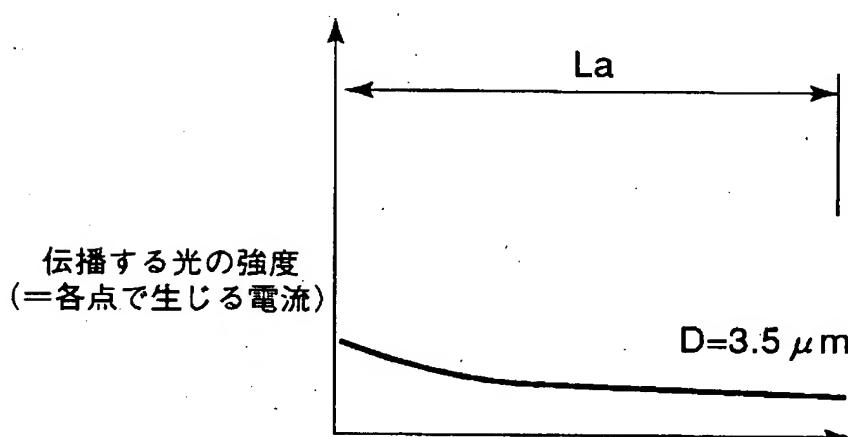
【図17】



【図18】

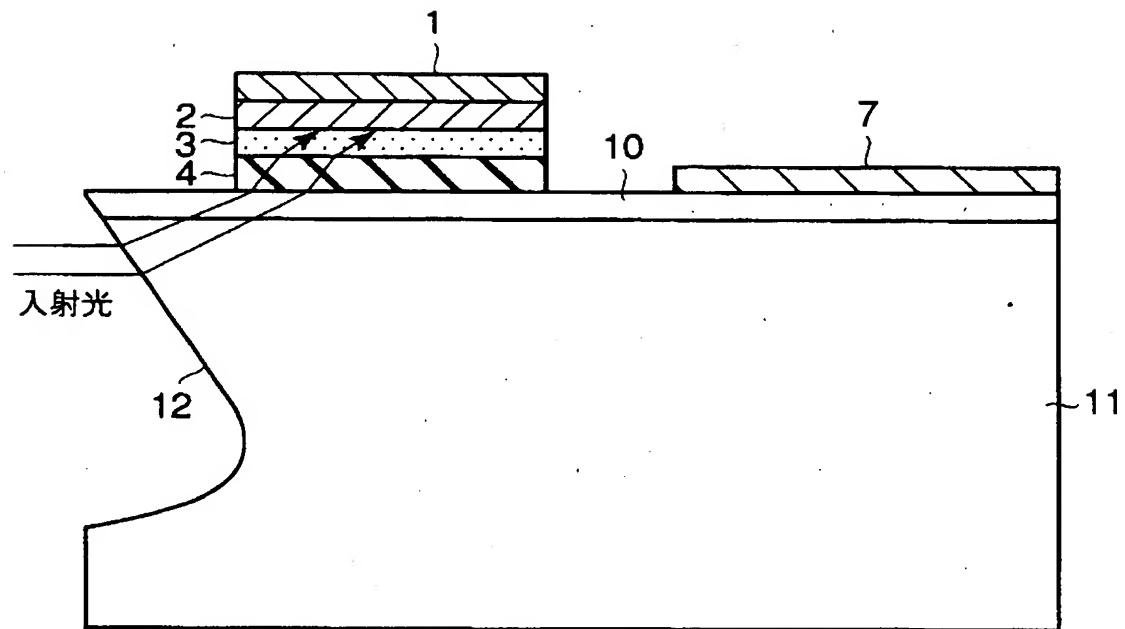


(a)

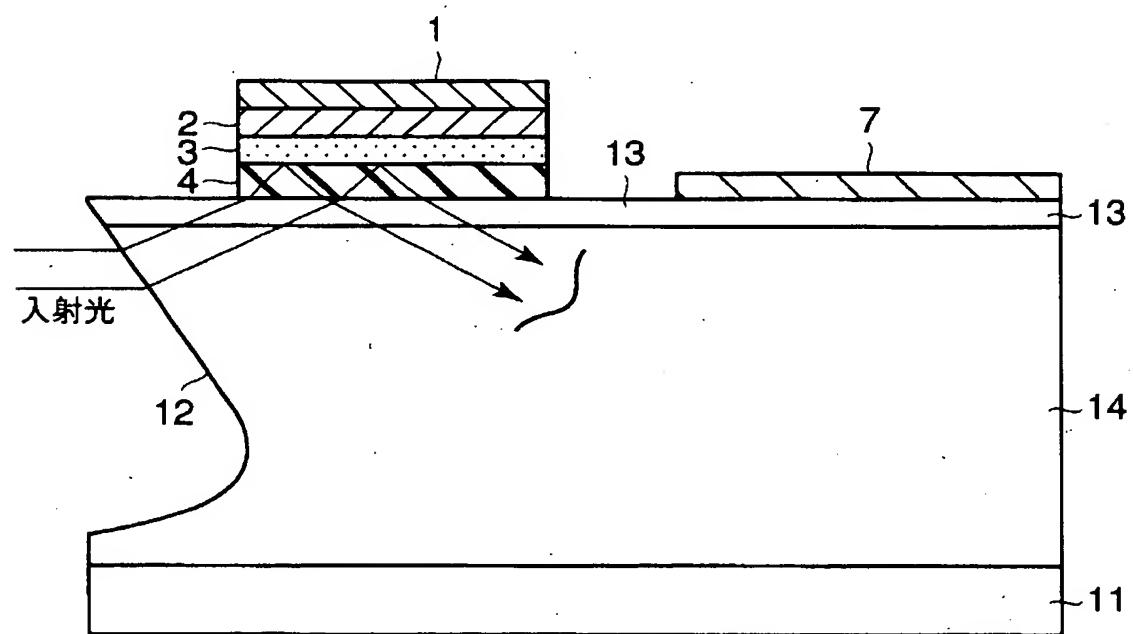


(a)

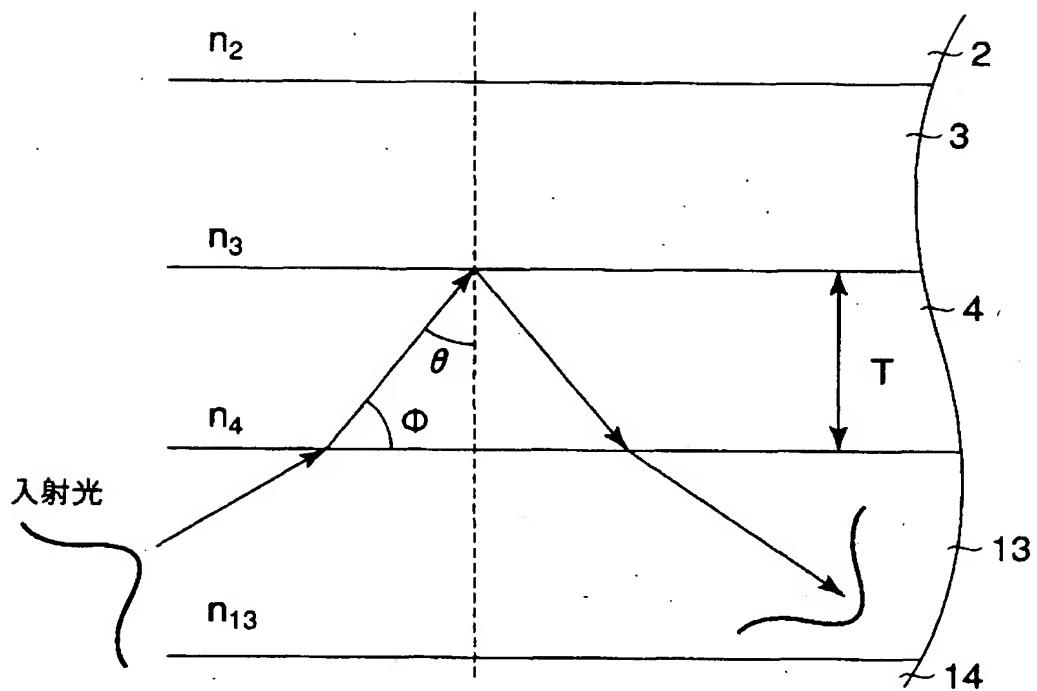
【図19】



【図20】



【図21】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 小型で高効率の半導体受光素子を実現する。

【解決手段】 第1の半導体層15、光吸收層4、第2の半導体層3の各屈折率、及び入射光の入射角を調整することによって、光吸收層4に入射された光の一部を光吸收層4内と第1の半導体層15内との少なくとも一方を第2の半導体層3の下面に平行方向に伝搬させ、かつ光吸收層4に入射された光の他の一部を第2の半導体層3の下面で反射し光吸收層4内及び第1の半導体層15内を斜め方向に伝搬させている。

【選択図】 図1

出願人履歴情報

識別番号 [000000572]

1. 変更年月日 1990年 8月29日

[変更理由] 新規登録

住 所 東京都港区南麻布5丁目10番27号

氏 名 アンリツ株式会社